

**Petr BITALA¹, Václav NEVRLÝ², Michal STŘIŽÍK³, Zdeněk ZELINGER⁴,
Eva GRIGOROVÁ⁵**

HYDRODYNAMICKE NESTABILITY PLAMENE ZKOUMANÉ V LABORATORNÍM MĚŘÍTKU

HYDRODYNAMIC INSTABILITIES OF FLAME INVESTIGATED IN LABORATORY SCALE

Abstrakt

Plameny simulované v laboratorních podmínkách zahrnují některé jevy, které se klíčovým způsobem projevují také v případě reálného požáru. Jedním z takových fenoménů jsou vírové struktury a nestability plamene. Tento příspěvek stručně shrnuje problematiku vzniku hydrodynamických nestabilit v prostředí nepředmíseného plamene a představuje původní výsledky získané infračerveným snímkováním plamene laboratorního pohárkového hořáku a numerickou simulací tohoto plamene pomocí nástroje CFD modelování na Fakultě bezpečnostního inženýrství.

Klíčová slova: nestability, plamen, pohárkový hořák, monitorování, numerická simulace

Abstract

Flames simulated in laboratory involve some phenomena, which are of key importance also in case of a real fire. The vortical structures and instabilities of flame are such the examples. This contribution briefly summarizes the formation of hydrodynamic instabilities in an environment of nonpremixed flame and presents the original results obtained by infrared imaging of laboratory cup-burner flame and numerical simulations of this flame by the CFD modelling tool at the Faculty of Safety Engineering.

Key words: instabilities, flame, cup burner, monitoring, numerical simulation

Úvod

Laboratorní studie hydrodynamických nestabilit plamene nacházejí na poli požárně bezpečnostního inženýrství uplatnění například při vývoji a testování sofistikovaných systémů detekce požáru [1]. Vedle těchto praktických aspektů však mohou vhodně koncipované experimenty poskytnout podstatné informace o základních principech přenosu tepla a interakce hmoty a záření v prostředí plamene. Zároveň se jedná o užitečný zdroj dat nutných pro validaci nástrojů matematického modelování požáru.

¹ Ing., VŠB - TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Katedra požární ochrany a ochrany obyvatelstva, Lumírova 13, 700 30 Ostrava - Výškovice, e-mail: petr.bitala@vsb.cz

² Ing., Ph.D., VŠB - TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Laboratoř výzkumu a managementu rizik, Lumírova 13, 700 30 Ostrava - Výškovice, e-mail: vaclav.nevrlý@vsb.cz

³ Ing., Ph.D., VŠB - TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Laboratoř výzkumu a managementu rizik, Lumírova 13, 700 30 Ostrava - Výškovice, e-mail: michal.strizik@vsb.cz

⁴ doc. Ing., Ph.D., VŠB - TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Lumírova 13, 700 30 Ostrava - Výškovice

⁵ Ing., VŠB - TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Lumírova 13, 700 30 Ostrava - Výškovice

Vznik a rozvoj vírových struktur při požárech

Původ turbulentního proudění při požárech za běžných podmínek spočívá především ve vznášivém zrychlení zahřátých zplodin hoření, které mají nižší hustotu než okolní vzduch. Vlivem hydrodynamických nestabilit vznikajících na tomto rozhraní se v prostředí plamene přirozeně utváří komplexní vírové struktury, které jsou jedním z charakteristických projevů chování požáru. Podrobný kvalitativní rozbor procesu formování vírových struktur při požárech hořlavých kapalin podává Tieszen et al. [2], přičemž uvádí tři zásadní principy související s tvorbou vírových struktur:

1. vznik rotačního pohybu v malých měřících v souvislosti s přítomností rozdílů hustot a působením vektoru gravitace (baroklinická vířivost);
2. růst velkorozměrových vírových struktur (amalgamace a párování);
3. turbulentní kaskádní proces rozpadu velkých vírů (produkce malých vírových struktur).

Na základě teorie podobnosti se pro popis turbulentních toků využívají bezrozměrná charakteristická čísla. Poměr inerciálních a vazkých sil při proudění tekutin popisuje dobře známé Reynoldsovo číslo (Re) ve formě (1):

$$Re = u \cdot L / \nu \quad (1)$$

kde u symbolizuje charakteristickou rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], L charakteristický rozměr [m] a ν kinematickou viskozitu [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]. V případě hydrodynamických nestabilit indukovaných tepelným vzhnozem, resp. gradientem hustot na rozhraní mezi dvěma vertikálními proudy, tvoří zásadní silovou složku působení gravitačního pole. Pro popis proudění, kde nestability vznikají na základě tohoto principu, se proto používá Richardsonovo číslo (Ri) obecně definované vztahem (2):

$$Ri = (\rho_{\infty} - \rho_p) g \cdot d / (\rho_{\infty} \cdot u^2) \quad (2)$$

Zde je ρ_{∞} hustota okolního prostředí (vzduchu) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], ρ_p je hustota média ve vzhnosném proudě [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. V tomto kontextu se může jednat o plyn lehčí než vzduch, případně směs zahřátých reaktantů a produktů hoření. V případě nepředmíseného plamene, kde se projevují značné prostorové nehomogenity, lze jen obtížně definovat globální hodnotu hustoty. Jako vhodné kritérium zde proto může sloužit „počáteční“ Richardsonovo číslo, které charakterizuje proudění pouze v místě vyústění paliva do hořáku, přičemž platí vztah (3):

$$Ri_0 = g \cdot d / u_f^2 \quad (3)$$

kde d je průměr otvoru vyústění paliva [m] a u_f je počáteční rychlost proudění paliva [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. Experimentální pozorování pulsujících plamenů poukázala na korelaci mezi dvojicí charakteristických čísel, a to Froudeho číslem (Fr) a Strouhalovým číslem (St), pro která platí:

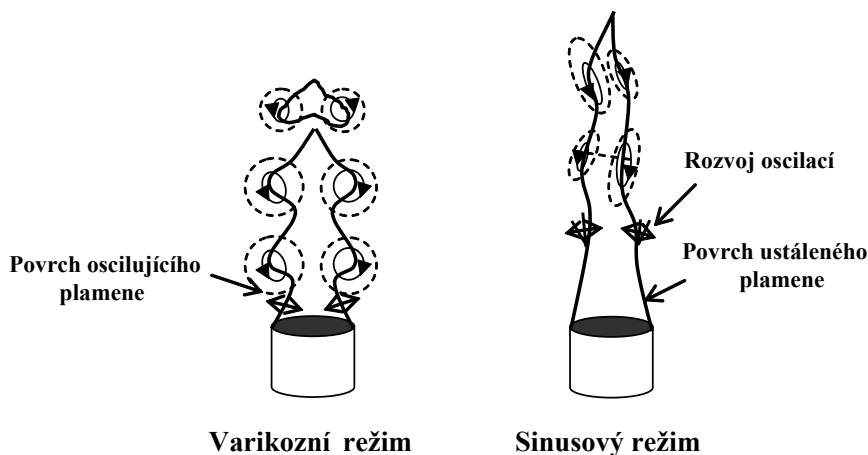
$$Fr = u^2 / (L \cdot g) \quad (4)$$

$$St = f \cdot L / u \quad (5)$$

kde g je tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], a f je charakteristická frekvence vznikajících hydrodynamických nestabilit [Hz].

Cetegen a Ahmed [3] shromáždili širokou škálu experimentálních dat získaných pozorováním nepředmíseného plamene za různorodých okrajových podmínek (typů paliva, rozměrů hořáku, apod.). Empirická závislost $f = 1,5 d^{-1/2}$ stanovená na základě rozboru těchto dat se často používá pro odhad frekvence pulsace plamene při požárech.

Cetegen a Dong [4] popisují tzv. varikózní a sinusový režim nestabilit (viz Obrázek 1), které se uplatňují v závislosti na parametrech proudění paliva a obtékajícího vzduchu. Bylo pozorováno, že se zvyšující se hodnotou Ri_0 se vlivem rostoucího významu vztahových sil zvyšuje pravděpodobnost výskytu pulsace plamene ve varikózním režimu.



Obrázek 1: Schématické zachycení varikózního a sinusového režimu nestabilit plamene

Studie hydrodynamických nestabilit plamene v laboratorním měřítku

Přístup zaměřený na výzkum fyzikálních a chemických jevů v laboratorním měřítku je využíván v celé řadě vědních disciplín a již řadu let také při výzkumu procesů hoření a hašení v oboru požárně bezpečnostních věd [5]. Experimentální studie hydrodynamických nestabilit plamene prováděné na adaptovaných zkušebních zařízeních v laboratorním měřítku umožnily zkoumat vliv změny různých okrajových podmínek (přívodu paliva a vzduchu, případně jiného oxidačního činidla, ředění směsi, přidavek hasiva, atd.). Tento přístup rovněž poskytl rozšířené možnosti při využití nástrojů matematického modelování a vysvětlení podstaty experimentu na základě pokročilých výpočetních simulací.

Významné studie zabývající se předmětnou problematikou byly provedeny na standardizovaných hořácích široce používaných a dobře známých v oblasti požárně bezpečnostních věd a ve vědecké komunitě zabývající se problematikou spalování. Díky této strategii je možné podmínky experimentu přizpůsobit specifickému účelu, a zároveň těžit z předchozích poznatků vědeckého zkoumání. Tento faktor zvyšuje míru interpretovatelnosti naměřených dat a použitelnosti těchto výsledků například pro účely komparativních studií a srovnání s výsledky výpočetních simulací. V dané souvislosti je potřeba zmínit zejména dva typově obdobné hořáky, které vytvářejí osově symetrický laminární nepředmísený plamen:

- Santorův hořák;
- Pohárkový hořák.

Santorův hořák je pojmenován po Robertu J. Santorovi, který v roce 1983 publikoval výsledky měření sazových částic v nepředmíseném plameni tohoto hořáku [6]. Plynné palivo je přiváděno střední trubicí hořáku. Obtokem je pak přes vrstvy sítě, skleněných kuliček a voštin

přiváděn laminarizovaný proud vzduchu. Plamen Santorova hořáku byl rozsáhle studován v souvislosti s procesy vzniku, růstu a oxidace sazových částic [6 - 10]. Zároveň byl Santorův hořák využit pro stanovení účinnosti hasiv [11]. Santorův hořák bývá ve spodní části vybaven akustickým měničem (reproduktorem), který slouží ke stabilizaci plamene „uzamknutím“ pulsace plamene na požadované frekvenci.

Pohárkový hořák (cup burner) standardizovaný normativními předpisy ISO 14520-1 [12] a NFPA 2001 [13] je běžně využíván pro stanovení účinnosti (efektivní hasební koncentrace) plyných hasiv. V předchozích publikovaných studiích se uvádí, že pohárkový hořák vytváří osově symetrický, téměř laminární, nepředmísený (obtokový) plamen. Bylo pozorováno, že inhibice plamene pohárkového hořáku souvisí s hydrodynamickými nestabilitami, jejichž rozvojem je dosaženo výsledného uhasnutí. Linteris, Takahashi a Katta [14 - 16] podrobně zkoumali tento proces, přičemž aplikovali metody snímání úzko-pásmové emise (chemiluminiscence CH radikálu) ve viditelné oblasti, PIV (Particle Image Velocimetry) i výpočetní dynamiku tekutin (CFD modelování). Ve srovnání se Santorovým hořákem jsou v plameni pohárkového hořáku vlivem relativně velkého průměru vyústění paliva ($d_{\text{vnitřní}} = 28 \text{ mm}$) indukována nízkorychlostní pole proudění. Tato vlastnost implikuje nízká Froudeho čísla a fyzikální podobnost plamene pohárkového hořáku (uplatňujících se fenoménů) se skutečnými požáry, zejména co se týče požáru kaluže a nádrže kapalných uhlovodíků. Text následujících kapitol je věnován popisu experimentálního uspořádání, postupu měření a výpočetní simulaci pulsujícího plamene pohárkového hořáku za specifických podmínek zvolených pro tyto účely.

Modifikovaný pohárkový hořák včetně systému přívodu a regulace médií

Pohárkový hořák poskytuje širokou variabilitu v možnostech zkoumání hydrodynamických nestabilit v plameni charakterizovaném nízkými Froudeho čísly. Pro účely studií tohoto typu jsme provedli dílčí modifikace v konstrukčním řešení pohárkového hořáku navrhovaném dle NFPA 2001 [13]. Ve srovnání s tímto standardem je vzduch do hořáku, v našem případě z centrálního rozvodu tlakového vzduchu (kompresoru) nebo z tlakové láhve, přiváděn třemi horizontálními vstupy s roztečí 120° . Difuzor (výška 100 mm, vnitřní průměr 75 mm) je z důvodu vytvoření rovnoměrného profilu proudění vzduchu při obtékání plamene vyplněn skleněnými kuličkami o průměru 6 mm položenými na vrstvě drátěného síta. Vzduch je do tohoto prostoru přiveden polyamidovými hadičkami o vnějším průměru 12 mm. Před vstupem do difuzoru je vedení rozděleno polyetylenovými spojkami do příslušných tří větví napojených na mosazné závitové hadicové spojky.

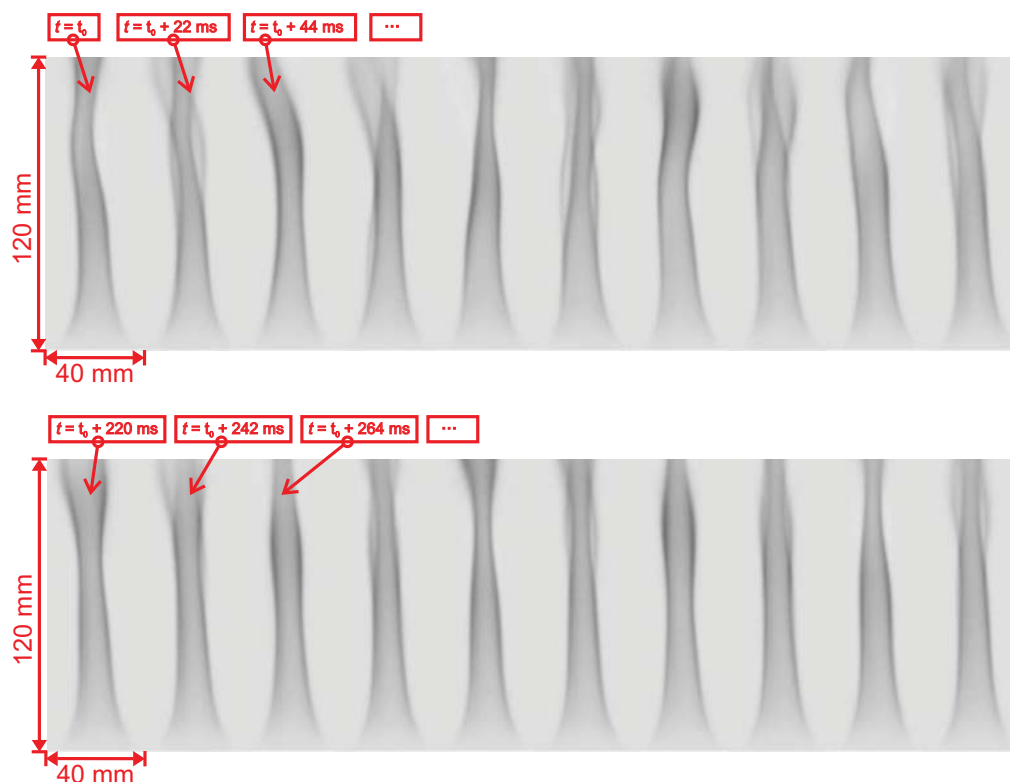
Vedení paliva je řešeno polyetylenovými hadičkami (vnější průměr 6 mm). Pro spojení jednotlivých regulačních a měřicích prvků jsou použity standardizované spojky (Swagelok). Průchod paliva do těla hořáku zajišťuje nerezová průchodka instalovaná ve vertikální ose zařízení. Na centrální tubus z nerezové oceli je nasazen a teflonovou páskou utěsněn vyměnitelný ocelový pohárek. V případě plyného paliva byl z důvodu zajištění rovnoměrného („top hat“) profilu proudění plynu pohárek vyplněn skleněnými kuličkami o průměru 3 mm, na něž byla položena vrstva drátěného síta z nerezové oceli (velikost oka 0,4 mm; průměr osnovního drátu 0,22 mm; 41 jednotek Mesh).

Původní zkušební sestava pohárkového hořáku (dle [12]) je v našem případě navíc doplněna o možnost použití plyného paliva. V komunitě požárně-bezpečnostních věd je jako standardní palivo pro pohárkový hořák často využíván n-heptan ($n\text{-C}_7\text{H}_{16}$). Nicméně pro tuto práci jsme použili plyné palivo, a to etylen (C_2H_4), který je využíván ve vědecké komunitě zabývající se problematikou spalování pro studie svítivého (vysoce sazovitého) plamene v laboratorních podmínkách.

Monitorování nestabilit plamene pohárkového hořáku

Snímkování plamene pohárkového hořáku bylo realizováno pomocí infračervené kamery Electrophysics PV320L2ZE využívající pyroelektrický FPA (Focal Plane Array) detektor. Optické ZnSe okénko vřazené mezi detektor a otočný element kamery umožňuje zachycení tepelného záření v relativně širokém rozsahu vlnových délek. Pro měření byl využit 35 mm objektiv s integrovanou manuálně nastavitelnou clonou. Mezi clonou a krycím okénkem detektoru byl pro omezení rozsahu spektrální citlivosti systému umístěn spektrální pásmový filtr umožňující minimalizovat intenzitní příspěvky emise a absorpce plyných specií v plameni. Signál zachycený na vybraném spektrálně omezeném rozsahu vlnových délek ($3,75 - 4 \mu\text{m}$) odpovídá pouze příspěvkům spojitého záření (emise/absorpce) sazových částic. Úroveň signálu pro každý obrazový pixel závisí na délce průchodu prostředím plamene a jeho lokálních optických parametrech. V daném případě se jedná o funkci teploty a koncentrace sazových částic na příslušné optické dráze.

Zobrazovaná oblast zaujímal přibližně 120 mm ve vertikálním směru. V daném uspořádání tak bylo dosaženo prostorového rozlišení přibližně 2 pixely na milimetr, tzn. $0,5 \text{ mm/pixel}$. Časové rozlišení bylo voleno s ohledem na dynamiku pozorovaného plamene. Byla použita nejvyšší frekvence snímkování, jakou dovoluje použitý typ IR kamery. Přitom byl zaznamenáván každý okamžitý snímek. Vlivem kolísání okamžité frekvence otočného přerušovače („chopper“) však nebylo dosaženo plné rychlosti snímkování odpovídající standardu PAL (50 Hz), nýbrž jen přibližně 45 snímků za vteřinu.



Obrázek 2: Výsledky měření. Reprezentativní sekvence dvaceti experimentálně stanovených snímků plamene etylenu zachycující přechod ze sinusového (nahore) do varikozního režimu nestability (dole)

Obrazová data získaná záznamem infračervených snímků byla převáděna v hloubce 14-bit interním A/D převodníkem infračervené kamery a přes USB 2.0 rozhraní přenášena do PC. Digitální sekvence infračervených snímků zaznamenávány v uživatelském prostředí software Velocity a konvertovány na videosekvence obsahující 1200 snímků (AVI soubory kódované bezztrátovou kompresí pomocí kodeku HuffYUV). Z těchto videosekvencí byla vybrána série dvaceti po sobě následujících snímků plamene etylenu (Obrázek 2).

Experimentální měření bylo prováděno v průběhu přibližně 2 minut při průtoku paliva (C_2H_4) $Q_{vf} = 1$ l/min a průtoku vzduchu $Q_{va} = 30$ l/min. Tyto hodnoty vycházejí z odečtu z příslušných rotametrů (Aalborg). Lze předpokládat, že se hodnoty průtoků se v průběhu experimentu nemění. Na základě přepočtu lze pro tento případ určit hodnotu Ri_0 dle (3) následovně (6):

$$Ri_0 = g \cdot d / u_f^2 = 9,81 \cdot 0,028 / 0,027^2 \approx 377 \quad (6)$$

Dané podmínky poskytují předpoklad pro přechodový režim mezi jednotlivými typy nestabilit. Ve vybrané sérii snímků lze zřetelně pozorovat přechod od asymetrického sinusového módu nestabilit k symetrické pulsaci v rozvíjejícím se varikozním režimu. Nevýrazný horizontální pohyb zóny hoření ve spodní části plamene je způsoben zřejmě důsledkem působení inerciálních sil. Vlivem poměrně vysoké rychlosti paliva ($u_f = 2,7$ cm/s) dochází k preferenci vzniku nesymetrických fluktuací v sinusovém režimu, jejichž příčinou však mohou být také nahodilé perturbace proudění v okolí hořáku.

Ustálený charakter plamene u paty hořáku je spojen s neúplným rozvojem varikozních vírových struktur v oblastech výše nad okrajem hořáku ($5 \text{ cm} < HAB < 10 \text{ cm}$). Toto chování plamene je zapříčiněno také chemickými vlastnostmi etylenu jako paliva. Nepředmísený plamen etylenu se projevuje neochotou přecházet do pulsujícího režimu hoření. Tato skutečnost je již řadu let známa a experimentálně byla pozorována na plameni Santorova hořáku. Teprve zcela současně však Katta et al [10] prokázali, že tento fenomén souvisí se vznikem sazových částic a vyzařováním tepelné radiací ze zóny hoření.

Použité experimentální technika je založena právě na monitorování emise absorpce sazí v zóně hoření. Lze předpokládat, že struktura plamene určená na základě této metody se neshoduje s konturami reakční zóny, kde dochází k nejintenzivnějšímu uvolnění tepla vlivem probíhajících radikálových reakcí. Nicméně, lze konstatovat, že se jedná o techniku vhodnou pro zkoumání výše diskutovaných fenoménů, která navíc umožňuje monitorování nestabilit plamene nejen v laboratorním měřítku.

Výpočetní simulace nestabilit plamene pohárkového hořáku

Výpočetní simulace plamene prezentované v rámci tohoto příspěvku byly provedeny v prostředí *Fire Dynamics Simulator* v aktuálně dostupné verzi (FDS 5.5.0). Jedná se o nástroj CFD modelování vyvíjený s ohledem na problematiku tvorby a transportu kouře a tepla při požárech. Tento model numericky řeší formu Navier-Stokesových rovnic vhodnou pro výpočet toků tekutin při relativně nízkých rychlostech indukovaných vlivem tepelného vznosu.

Simulace plamene laboratorního pohárkového hořáku byly prováděny v režimu přímé numerické simulace (DNS). Parametry molekulárního přenosu hmoty (difuzní koeficient), tepla (součinitel tepelné vodivosti) a hybnosti (kinematická viskozita) byly pro každou buňku výpočetní sítě přímo vypočítávány v každém časovém kroku simulace ($\Delta\tau = 0,1$ ms).

Geometrie výpočetní oblasti byla zvolena s ohledem na uspořádání experimentu. Pro simulace byla využita homogenní výpočetní síť v osově symetrickém (dvojměrném) uspořádání tvořená čtvercovými buňkami s velikostí strany 0,5 mm. Celkově byla tedy výpočetní oblast, která zahrnovala oblast od osy hořáku po vnější hranu válce obtoku vzduchu, rozdělena ve směrech os x , y a z na $96 \times 1 \times 288$ buněk.

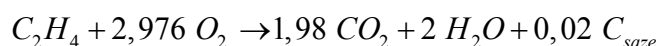
Počáteční podmínky výpočtu byly stanoveny tak, aby v mezích chyby měření odpovídaly podmínkám experimentu:

- Počáteční teplota ($t_0 = 25 \text{ °C}$)
- Počáteční tlak ($p_0 = 98\,500 \text{ Pa}$)
- Vlhkost vzduchu ($RH = 35 \text{ %}$)
- Počáteční rychlost ve směru osy z ($w_0 = 0,09 \text{ m/s}$)

Teplota ocelové stěny pohárkového hořáku ($t_{cup} = 350 \text{ °C}$) byla stanovena odhadem. Jedná se o hodnotu blízkou předpokladům Takahashiho, Linterise a Katty [14 - 16], kteří v případě numerických simulací pohárkového hořáku uvažovali teplotu stěny 600 K.

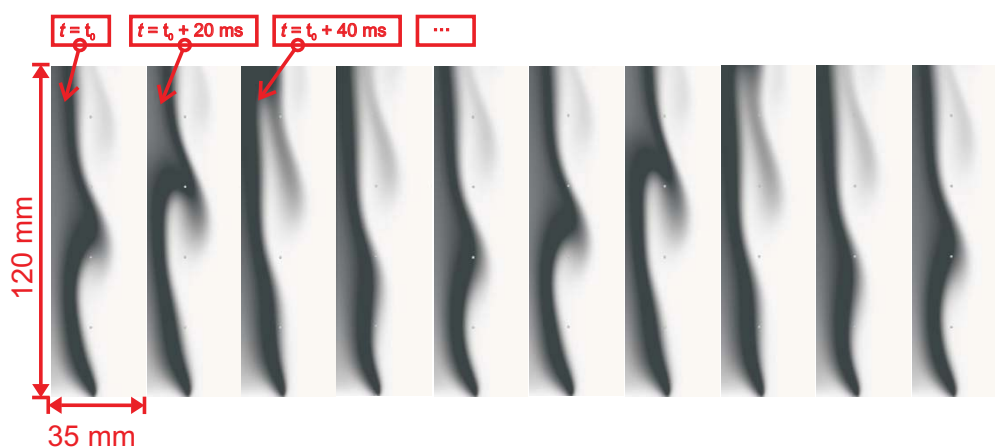
Okrajové podmínky byly definovány jako otevřené (nulový gradient veličin) na stěnách $x = x_{max}$ a $z = z_{max}$. Na ostatních stěnách ($x = x_{min}$ a $y = y_{min}$ i $y = y_{max}$) byla definována podmínka zrcadlové symetrie tak, aby výpočet probíhal v osově symetrii podle vertikální osy hořáku. Zdrojové prvky vzduchu (obtok) a paliva (hořák) byly definovány jako okrajová podmínka na stěně. Současně byla zadána vertikální rychlost proudění obtékajícího vzduchu ($u_a = 0,09 \text{ m/s}$) odpovídající v mezích experimentální chyby měřenému průtoku vzduchu ($Q_{v,a}$). Uvolňování paliva bylo z plochy pohárku stanoveno okrajovou podmínkou hmotnostního průtoku ($Q_{m,f} = 0,03 \text{ kg/m}^2/\text{s}$).

Chemická reakce byla ve výpočetní simulaci charakterizována tzv. „mixture fraction“ modelem.



Bylo uvažováno jednostupňové (dokonalé) spalování etylenu a odhadem určeno, že 1 % hmotnosti paliva je hořením transformováno na sazové částice, čemuž odpovídají následující stechiometrické koeficienty:

Bilanční rovnice pro sazové částice není daným modelem explicitně řešena. Jedná se tedy o aproximaci nekonečně rychlé chemické přeměny („mixed-is-burned“) paliva na produkty hoření, která nezachycuje procesy tvorby, růstu a oxidace sazových částic.



Obrázek 3: Reprezentativní sekvence deseti okamžitých snímků plamene etylenu (výsledky výpočetní simulace). Snímky zachycují rozložení teplot, přičemž černá barva symbolizuje maximální teplotu

Výskyt dvou (téměř) totožných snímků je možné v naměřených (Obrázek 2) i simulovaných (Obrázek 3) sekvencích identifikovat v časovém intervalu ~ 100 ms. Na základě vizuálního srovnání snímků lze tedy stanovit přibližnou frekvenci pulsace plamene ve varikozním režimu $f \approx 10$ Hz.

Jak již bylo poznamenáno výše v textu, přítomnost zvýšených koncentrací sazových částic v plameni a jejich tepelná radiace zásadním způsobem ovlivňuje charakter hydrodynamických nestabilit plamene. To je patrně hlavním důvodem skutečnosti, že na rozdíl od výsledků experimentu se ve výsledcích výpočetní simulace projevují plně rozvinuté vírové struktury. Ověření této hypotézy by vyžadovalo implementaci modelu popisujícího fenomén tvorby, růstu a oxidace sazových částic. Lautenberger et al. [17] koncipoval submodel popisující vznik a oxidaci sazových částic a implementoval jej ve verzi FDS 2.0. Tento model však není v aktuální verzi FDS standardně uživatelsky dostupný.

Další možností přiblížení predikce k experimentálním výsledkům je optimalizace nastavení parametrů modelu radiace a hydrodynamického modelu (např. Prandtlova a Schmidtova čísla). V rámci tohoto kroku je však vhodné provedení citlivostní analýzy a zhodnocení vlivu jednotlivých vstupních dat a parametrů výpočtu na výsledky modelu. Je také nutné poznamenat, že za okrajové podmínky osově symetrie není možné postihnout sinusový režim nestabilit. Proto je plánováno provedení série numerických simulací v trojrozměrné geometrii.

Závěr

Projevy turbulentních struktur (vírů) a mihotavý charakter plamene jsou zcela zásadními aspekty realistického popisu požáru. Studie prezentovaná v rámci tohoto příspěvku postihuje monitorování hydrodynamických nestabilit metodou spektrálně filtrovaného infračerveného snímkování plamene a výpočetní simulaci. Experimentální platforma založená na standardizovaném hořáku vytvářejícím plameny s nízkým Froudeho číslem nabízí v kombinaci se zvoleným postupem sběru a zpracování dat velice slibný nástroj pro monitorování hydrodynamických nestabilit plamene s odpovídajícím časovým a prostorovým rozlišením. Tímto způsobem je možné získat cenná data pro testování a validaci nástrojů CFD modelování požárů, případně jejich submodelů. Nadále jsou plánovány výzkumné aktivity orientované na rozvoj technik infračervené diagnostiky plamene a zpřesňování prediktivních schopností výpočetních simulací plamene.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl díky podpoře projektu Specifického vysokoškolského výzkumu č. SP/2010148 schváleného v rámci Studentské grantové soutěže (SGS) Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Autoři dále děkují Ministerstvu životního prostředí ČR za podporu v rámci projektu SPII 1a10 45/07.

Použitá literatura

- [1] THUILLARD, M. A new flame detector using the latest research on flames and fuzzy-wavelet algorithms, *Fire Safety Journal*. 2002, 37, 371 - 380.
- [2] TIESZEN, S.R.; NICOLETTE, V.F.; GRITZO, L.A.; HOLEN, J.K.; MURRAY, D., MOYA, J.L. *Vortical Structures in Pool Fires: Observation, Speculation, and Simulation*. SANDIA REPORT SAND 96-2607 UC-722. Albaquerque, 1996.

- [3] CETEGEN, B.M.; AHMED, T.A. Experiments on the Periodic Instability of Buoyant Plumes and Pool Fires. *Combustion and Flame*, 1993, 93, 157 - 184.
- [4] CETEGEN, B.M.; DONG, Y. Experiments on the instability modes of buoyant diffusion flames and effects of ambient atmosphere on the instabilities. *Experiments in Fluids*. 2000, 28, 546 - 558.
- [5] NEVRLÝ, V.; BITALA, P.; STRIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; DANIHELKA, P.; ZAVILA, O.; KOLLÁRIK, T. Laboratorní studie plamene jako nástroj pro lepší porozumění průmyslovým požárům. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, řada bezpečnostní inženýrství*. 2008, 3 (1), 79 - 88.
- [6] SANTORO, R. J.; SEMERJIAN, H. G.; DOBBINS, R. H. Soot particle measurements in diffusion flames. *Combustion and Flame*. 1983, 51, 203 - 218.
- [7] SHADDIX, C.R.; HARRINGTON, J.E.; SMYTH, K.C. Quantitative Measurements of Enhanced Soot Production in a Flickering Methane/Air Diffusion Flame. *Combustion and Flame*, 1994, 99, 723 - 732.
- [8] SHADDIX, C. R.; SMYTH, K. C. Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames. *Combustion and Flame*. 1996, 107, 418 - 452.
- [9] SAPMAZ, H.; LIN, C.X.; GHENAI C. Measurements of soot volume fraction in pulsed diffusion flame by laser induced incandescence. *Experiments in Fluids*. 2008, 44, 137 - 144.
- [10] KATTA, V.R.; ROQUEMORE, W.M.; MENON, A.; LEE, S.Y.; SANTORO, R.J.; LITZINGER, T.A. Impact of soot on flame flicker. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2009, 32, 1343 - 1350.
- [11] SMYTH, K. C.; EVEREST, D.A. Effect of CF3I Compared to CF3Br on OH and Soot Concentrations in Co-Flowing Propane/Air Diffusion Flames. *Proceedings of the Combustion Institute*. 1996, 26, 1385 - 1393.
- [12] ISO 14520-1. *Gaseous fire-extinguishing systems - Physical properties and system design*. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
- [13] NFPA 2001. *Standard for Clean Agent Fire Extinguishing Systeme*. Quincy: National Fire Protection Association, 2008.
- [14] KATTA, V.R.; TAKAHASHI, F.; LINTERIS G.T. Suppression of cup-burner flames using carbon dioxide in microgravity. *Combustion and Flame*. 2004, 137, 506 - 522.
- [15] TAKAHASHI, F.; LINTERIS, G.T.; KATTA, V.R. Extinguishment mechanisms of coflow diffusion flames in a cup-burner apparatus. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007, 31, 2721 - 2729.
- [16] LINTERIS, G.T.; TAKAHASHI, F.; KATTA, V.R. Cup-burner flame extinguishment by CF3Br and Br2. *Combustion and Flame*. 2007, 149, 91 - 103.
- [17] LAUTENBERGER, C.W.; DE RIS, J.L.; DEMBSEY, N.A.; BARNETT, J.R.; BAUM, H.R. A simplified model for soot formation and oxidation in CFD simulation of non-premixed hydrocarbon flames. *Fire Safety Journal*. 2005, 40, 141 - 176.

